窒素量の異なるオーステナイト系ステンレス鋼の高サイクル疲労特性*

西 田 新 一^{*1}, 服 部 信 祐^{*1}
西 岡 健 史^{*2}, 山 本 章 夫^{*3}High-Cycle Fatigue Properties of Austenitic Stainless Steels
with Different Nitrogen ContentShin-ichi NISHIDA, Nobusuke HATTORI,
Takeshi NISHIOKA and Akio YAMAMOTO

The fatigue properties of austenitic stainless steels with different nitrogen content have been investigated in the high-cycles region using Ono-type rotating bending fatigue testing machine. The materials used in this test were three kinds of austenitic stainless steels, i.e. typical austenitic stainless steel, SUS 304 and nitrogen-contained SUS 304 (SUS 304 N and YUS 170). When considering the fatigue limit is the maximum stress amplitude by 1×10^7 cycles, the fatigue limit of SUS 304 N becomes remarkably larger than that of SUS 304, while the fatigue limit of YUS 170 is smaller than that of SUS 304 irrespective of higher nitrogen content in YUS 170. The above difference would be caused by the difference of the effect of strain aging and deformation induced martensite transformation, because YUS 170 has more stable austenitic structure than SUS 304 according to higher nitrogen content. In addition, the non-propagating micro-cracks have not been observed in the not-broken specimens of SUS 304 and SUS 304 N subjected to the stress amplitude of fatigue limit by 1×10^7 cycles. While a few micro-cracks were observed in the specimen of YUS 170 under same condition as the above and these specimens were broken under the following same stress amplitude by 1.2×10^7 cycles.

Key Words: Fatigue, Austenitic Stainless Steel, Nitrogen, Fatigue Limit, Non-Propagating Micro-Crack, Strain Aging, Strain Hardening, Deformation Induced Martensite Transformation, Transformation Ratio

1. 緒 言

著者らは先に、ともにオーステナイト組織を有し、かつ非磁性鋼として知られている高マンガン鋼(以下、HM 鋼と称する)と SUS 304 を用いて疲労試験を行った結果、いずれも明りょうな折れ点、かつ同じ値の疲労限が存在するにもかかわらず、その疲労限応力を 1×10^7 回繰返した後の試験片表面で、HM 鋼では微視的停留き裂の存在が認められたのに対し、SUS 304 ではすべり帯のみ観察でき、微視的停留き裂の存在は認められないことを報告した⁽¹⁾。その原因の一つは、両供試材に含まれる炭素の量、すなわち HM 鋼では約 0.2%、SUS 304 では 0.04% と非常に炭素量が異なっていることに起因する、ひずみ時効硬化の差異によるものではなからうかと想定した。そこで、SUS 304 が HM 鋼とほぼ等しい炭素量を有する場合には、どのような疲労特性を示すかは非常に興味あるところである。

一方、ステンレス鋼は、周知のごとく近年メンテナ

ンスフリーの観点から特に注目されている材料であり、その特徴の第 1 番めに挙げられるのは、耐食性が優れていることである。そこで、上述したような理由によって SUS 304 に HM 鋼とほぼ同程度の炭素量を添加した場合には、耐食性の低下が問題となる。本来、HM 鋼中の炭素は固溶強化元素としての作用を目的として多量に添加されたものであり、SUS 304 に関しては、実際の使用も考慮すると同じ効果が期待できる窒素に着目した研究がより重要であると考えられる。また、SUS 304 に窒素量を増やした SUS 304 N などが建築構造用部材として用いられている⁽²⁾。

そこで、本研究では窒素量を変えた 3 種類のオーステナイト系ステンレス鋼を用いて、疲労強度評価とき裂の発生挙動にとくに着目した研究を行い、得られた結果を報告する。

2. 実 験 方 法

表 1 に、供試材の化学成分を示す。SUS 304 に含まれる窒素量(0.042%)をベースに考えると、SUS 304 N で約 5 倍含有しており、YUS 170 の場合、約 8 倍であることがわかる。

表 2 に、それぞれの機械的性質を示す。SUS 304 N は SUS 304 に比べると窒素量が増えたために 0.2%

* 原稿受付 1998 年 6 月 26 日。

^{*1} 正員、佐賀大学理工学部 (☎ 840-8502 佐賀市本庄町 1)。^{*2} 学生員、佐賀大学工学部 [現: 名村造船(株)]。^{*3} 新日本製鉄(株) (☎ 293-0011 富津市新富 20-1)。

E-mail: nishida@me.saga-u.ac.jp

Table 1 Chemical composition

Materials	mass %								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N
SUS304	0.04	0.51	0.86	0.027	0.05	8.81	18.86	—	0.042
SUS304N	0.05	0.64	0.83	0.029	0.001	7.64	19.02	0.1	0.21
YUS170	0.03	0.78	0.58	0.027	0.001	13.22	24.35	—	0.335

Table 2 Mechanical properties

Materials	Proof stress MPa	Tensile strength MPa	Elongation %
SUS304	296	663	71
SUS304N	469	793	49
YUS170	445	808	55

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

耐力あるいは引張強さの向上が認められる。YUS 170 でも、SUS 304 N と同様、SUS 304 に比べると機械的性質の向上は認められる。しかし、SUS 304 N に比べると窒素の量がさらに多い割には引張強さで若干の向上が認められるものの、0.2%耐力に関しては逆に少し低い値を示している。

図 1 に、試験片形状および寸法を示す。すべての試験片は、圧延方向に採取しており、かつ板厚表面側に疲労強度に影響のない程度の浅い部分切欠きを設けている。実験に際しては、試験片の部分切欠部をペーパー研磨した後、500°C で 2 時間の真空焼なましを行い、さらに電解研磨で直径で約 40 μm 除去してから試験に用いている。疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験機（繰返し速度：3 400 rpm）を用いて行った。

なお、すべての実験においては、本材料の高周波数疲労試験時に問題となる発熱破壊防止のため蒸留水による冷却を行っている。これに関しては、すでに西谷らによって大気中での発熱の影響がない低周波数の条件下で行われた疲労試験と差異がないことが確認されている⁽³⁾。

3. 実験結果

3・1 疲労強度評価 図 2 は、疲労試験より得られた $S-N$ 曲線である。明らかに 3 種類の供試材の疲労強度には差があり、 1×10^7 回繰返し時間強度を疲労

Fig. 2 $S-N$ curves

限とした場合、SUS 304；280 MPa、SUS 304 N；320 MPa および YUS 170；230 MPa である。各供試材に含まれている窒素は、固溶強化作用があるために、当初はこの窒素含有量に対応した疲労強度が得られると考えていたが、その予想に反し SUS 304 N の疲労限がいちばん高い値を示した。また、疲労限よりも高い任意の応力振幅における時間強度に関しては、YUS 170 と SUS 304 N において差異は認められず、SUS 304 の場合に比べて長寿命となっている。また、この傾向は高応力振幅になるほど顕著であることがわかる。このことより、本供試験材に含まれる窒素は、固溶強化作用が有効に働き、疲労強度の向上につながっていると考えられる一方で、必要以上に多量に含有した場合には必ずしも疲労強度に反映されないばかりでなく、逆に低下につながる場合もあることを明らかにした。ここで、表 2 に示す静的な機械的性質と疲労限の関係を見る。例えば引張強さに対する疲労限の比すなわち σ_{w0}/σ_B は、SUS 304；0.47、また SUS 304 N；0.43 とほぼ等しい値を示す一方で、YUS 170 に関してはわずか 0.29 に低下している。すなわち、実験方法のところでも述べたように、特性改善のため添加された窒素の影響について、SUS 304 N では機械的性質の向上に起因して、それに比例した形で疲労強度の上昇も認められる。それに対して、YUS 170 では

SUS 304 N に比べて窒素含有量が多いにもかかわらず機械的性質の向上に関してそれほどの効果は示さず、静的強度をベースに考えた疲労強度 σ_{w0}/σ_B もかなり低い値を示すことがわかった。

3・2 疲労き裂挙動 図3は、各供試材の代表的な疲労き裂の発生および伝ば挙動をレプリカ法により連続観察した結果である。SUS 304 と SUS 304 N に関しては、全寿命の約10～15%の繰返し数比の段階で、任意の結晶の粒界もしくはその近傍からひとつの疲労き裂が発生し、繰返し数の増加に伴って伝ば、破断にいたる。一方、YUS 170 では疲労き裂が発生す

る個所に関しては他の二つの供試材と顕著な差異は認められないものの、き裂の発生する数が2～3個と複数個であることと、またその発生する繰返し数比が5～10%と他の二つの供試材に比べると小さくなっているような相違点が認められる。

図4は、各供試材の疲労限度力振幅における実験後の試験片表面を観察した結果である。図4より、SUS 304 および SUS 304 N においては 1×10^7 回繰返し後の試験片表面に、すべり帯は観察されるものの、炭素鋼などで観察されるような微視的停留き裂の存在は認められない。すなわち、SUS 304 および SUS 304

Fig.3 Successive surface observation of fatigue crack initiation

Fig. 4 Specimen's surface state under the stress amplitude of fatigue limit by 1×10^7 cycles

Nの疲労限は、疲労き裂の発生限界により決定されていることがわかる。これに対してYUS 170ではこの段階で2 mm程度の複数の疲労き裂の存在が認められ、さらに同じ応力振幅で継続して試験した結果、 1.2×10^7 回で破断に至った。図2に示すように、応力振幅を210 MPaまで下げて実験を行ったが、 2.4×10^7 回で破断に至った。すなわち、図2に示すS-N曲線からもわかるように本実験範囲においてはSUS 304あるいはSUS 304 Nなどのように明確な折れ点は認められない。

4. 考 察

上述したごとく、SUS 304をベースとして窒素を多量添加したSUS 304 NとYUS 170では、その窒素が疲労強度に及ぼす効果に関して、明らかな差異が認められた。そこで、その点に関するいくつかの原因を考察していく。

まず、各供試材のひずみ硬化の影響を検討する目的で、同一の応力振幅で疲労試験を行い、実験前後における結晶の硬さの変化を検討した。

図5は、応力振幅 $\sigma_a = 350$ MPaで各供試材に1結晶粒径程度の長さの疲労き裂が発生した時点で行った硬さ試験の結果である。図5には、実験前の結晶の平均硬さに対する実験後のすべり帯の発生した結晶粒内およびき裂先端部に位置する結晶の硬さの比を示している。これより、SUS 304およびSUS 304 Nではすべり帯の発生した結晶では、実験前の平均硬さに比べて約20%の硬さの上昇、また、き裂先端部近傍の結晶においては約30%の硬さ上昇が認められる。これに対して、YUS 170においては、すべり帯の発生した結晶およびき裂先端部における硬さ上昇は、わずか10%程度しか認められない。すなわち、SUS 304および

Fig. 5 Micro-Vickers hardness number of grain before and after test

SUS 304 Nではすべりの生じた結晶では、ひずみ硬化などにより疲労き裂の発生およびき裂進展の抵抗となり得る作用が顕著であるのに対して、YUS 170ではその作用が相対的に小さいといえる。

次に、オーステナイト系ステンレス鋼の特徴としてよく知られている加工誘起マルテンサイト変態の影響について検討してみる。一般に、ステンレス鋼の組織と合金元素との関係は、Ni当量とCr当量とからシェフラーの組織図を用いて求められる場合が多い。しかし、本研究で用いている供試材のように窒素を多量に含み、その影響まで考慮する場合には、以下に示すドロングの式⁽⁴⁾

$$\text{Ni 当量 [\%]} = \% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn} + 30 \times \% \text{N}$$

$$\text{Cr 当量 [\%]} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5 \times \% \text{Si} + 0.5$$

Fig. 6 DeLong's structure map

×%Nb

を用いたほうが適切であると言われている。

図6は、この式を用いて各供試材の全体的な組織の状態を予測した結果である。YUS 170ではSUS 304およびSUS 304 Nに比べてCr, Niに加えてN含有量がかかなり多いため(表1参照),非常に安定したオーステナイト組織となっていることがわかる。このことは、図7に示すごとくフェライトメータを用いて実験前後の磁性の変化を調べた結果からも知ることができる。すなわち、SUS 304では実験前にはほとんど磁性を示さなかったものが、実験後にはかなりの磁性を示すようになっており、これより加工誘起マルテンサイト変態を起こしたことがうかがえる。この傾向は当然のことながら応力振幅が大きくなるにつれてより右上がりの直線となっていることから明らかである。これに対して、SUS 304 Nではほんのわずかにその傾向が認められるものの、YUS 170に関してはほとんど認められず、加工誘起マルテンサイト変態を起こしているとは言い難い。このことも、図5に示すごとくYUS 170においてすべり帯が発生した結晶の硬さ上昇が、SUS 304およびSUS 304 Nに比べて劣る原因のひとつといえる。そしてこれらに起因して、図2に示すS-N曲線においてYUS 170では窒素を多量に添加しているにもかかわらずSUS 304 Nのような疲労強度向上が認められなかったものと考えている。

5. 結 論

窒素含有量の異なる3種類のオーステナイト系ステンレス鋼を用いて、疲労特性に及ぼす窒素の影響を検討した結果、以下のことを明らかにした。

(1) SUS 304およびSUS 304 Nでは 1×10^7 回繰

Fig. 7 Change in transformation ratio before and after test

返し時間強度を疲労限と定義した場合、明りょうな折れ点を示し、かつ疲労限の存在が認められる。しかし、実験後の表面観察の結果、炭素鋼に認められるような微視的停留き裂の存在は認められない。

(2) 上記(1)に対して、YUS 170に関しては、この実験範囲では折れ点は存在することなく、 1×10^7 回の応力振幅繰返し後破断に至らなかった供試材でも、表面観察を行った結果、疲労き裂が確認される。その後、同じ応力振幅で引き続き試験を行うと、き裂は伝ばし、破断に至る。

(3) オーステナイト系ステンレス鋼の疲労限は、固溶強化元素である窒素の添加量に必ずしも依存しない。

(4) 上記(3)に関して、デロングの式によるCr/Ni当量から推定した組織状態ならびに実験前後の組織の硬さ試験、磁性の変化などを考え合わせると、オーステナイト系ステンレス鋼では非常に安定したオーステナイト組織になってしまうと、加工誘起マルテンサイト変態などの硬化作用をおこし難くなるため、これが疲労強度の低下を引き起こす原因になると考える。

文 献

- (1) 西田新一・服部信祐・島田鉄也, 材料, 43-486 (1994), 324-328.
- (2) 志村保美, 溶接学会誌, 62-4 (1993), 267-272.
- (3) 西谷弘信・野口博司・西田新一・山口和彦, 機論, 56-525, A (1990), 1067-1073.
- (4) 例えば, ステンレス協会編, ステンレス鋼便覧, (1995), 112, 日刊工業新聞社.